養液栽培技術講習會專刊　第三輯　1～8, 1990

談水耕養液之組成

鈴木芳夫* 著
沈再發** 譯

我們知道植物體的80～90%是水，其餘部分由各種元素構成。這些元素中，有16種元素是高等植物生長發育所必須的，它們是碳（C）、氫（H）、氧（O）、氮（N）、磷（P）、鉀（K）、鈣（Ca）、鎂（Mg）、硫（S）、鐵（Fe）、錳（Mn）、硼（B）、鋅（Zn）、銅（Cu）、鉬（Mo）、氯（Cl）。前10種元素需要較多，稱為大量元素。後 6 種元素稱為微量元素。關於這些元素，在植物體內的作用及植物體的吸收的機制等可參考其他專業書籍，在此不多敍述。謹就營養液栽培—水耕（Soilless Culture，Hydroponics）的養液組成作一敍述：

一、次量元素

在歐美使用的蔬菜培養液中大量元素濃度範圍是：NO_3-N 5—15 me／1，NH_4-N 0—3 me／1，PO_4-P 2—4 me／1，K 2—8 me／1，Ca 6—10 me／1，Mg 1—4 me／1，SO_4—S1—4 me／1。在日本廣泛使用的園藝試驗場均衡培養液處方是：NO_3-N 16me／1，NH_4-N1⅓ me／1，PO_4-P 4 me／1, K 8 me／1，Ca 8 me／1，Mg 4 me／1，SO_4-S 4me／1。礫耕中廣泛利用這種培養液，並且在很多蔬菜的生育上都得到相當好的成果。

對該培養液的組成及濃度的決定過程，山崎肯哉氏做了以下的說明：欲以蔬菜的養分吸收量作為施肥的一個標準的話，以目前搜集所有蔬菜的吸收量，包括生育期別在內，雖然因種類不同其吸收量多少與成分間之比例略有所差異，但以含量最多的 K_2O 作為10的話，其他要素分別為N 6，P_2O_5 2，CaO8，MgO1.5，S 0.5。並且以不同生育期的植體分析結果，此成分間之比例也並無多大的變化；僅在幼苗期 N 略多，與 K_2O 比例相近而已。以此吸收成分比所做的組成培養液在容許的濃度範圍內，如其濃度降低時其成分比的組成也以同樣下降，欲以追肥回復其原有的濃度也簡單。因此，以此方式所訂的組成易成為實用的培養液。

以吸收比與上述類似的胡瓜之吸收量為例，介紹其均衡培養液組成濃度的決定方式和計算方法如表1。一株胡瓜的要素吸收量是：N 6 公克，P_2O_5 2.5公克，K_2O 10公克，CaO 6 公克，MgO 2 公克，SO_4 1 公克。首先把氧化物含量換算成元素含量（例如換算成 $P_2O_5 \rightarrow P$，$K_2O \rightarrow K$）。換算係數表示在第一欄，再把它換算成 me（毫克當量）。參考適宜濃度範圍，以上述的 me 量為標準，鉀之濃度為 8me／1條件時，計算其它成分濃度是多少。所得到的這些值就是與胡瓜成分量符合的均衡培養液之組成濃度。進一步作成實用性培養液時，還必須根據使用的肥料鹽進行修正。

園藝試驗所的均衡培養液，是根據蔬菜的肥料吸收比例大致相同的構想而決定的。但實際上不同作物的吸收量及其比例並非完全一定的。特別是番茄，以此培養液在高溫時易缺鈣而嚴重發生尻腐病。因此，神奈川園藝試驗場，注意到對鈣的吸收有拮抗作用的 N、K 的問題，提出減少

---

* 日本筑波大學教授
** 農試所鳳山熱帶園藝試驗分所分所長

表一 均衡培養液組成濃度之決定方法與其計算

		N	P_2O_5 →P	KO →K	CaO →Ca	MgO →Mg	SO_4 →S	計
換算係數			PO×0.437 P×2.295	KO×0.830 K×1.205	CaO×0.715 Ca×1.399	MgO×0.603 Mg×1.658	SO_4×0.333 S×3.000	
◉ 吸收成份量 g		6	2.5 →1.1	10 →8.3	6 →4.3	2 →1.2	1 →0.33	
（胡瓜每株）me		÷14mg ≒430	÷10.3mg ≒103	÷39mg ≒213	÷20mg ≒215	÷12mg ≒100	÷16mg ≒20	
○ 適宜濃度範圍 me／l		NO_3—N5—15—25 NH_4—NO—1—3	2—4—12	2—8—15	＊（23） 3—8—36	1-4-8	＊（23） 1—4—40	14—44—109
以鉀為8me／l時其他要素之值 me／l（元素×87／213）		16	3.9	8	8	3.8	0.8	均衡組成濃度
肥料計算 me／l	①$MgSO_4$•$7H_2O$	—	—	—	—	4	4	123×4（me／l）=49.2mg／l
	②Ca（NO_3）$_2$•$4H_2O$	NO_3—N8	—	—	8	—	—	118×8（me／l）=944mg／l
	③KNO_3	NO_3—N8	—	8	—	—	—	101×8（me／l）=808mg／l
	④$NH_4H_2PO_4$	NH_4—N1.33	4	—	—	—	—	38×4（me／l）=152mg／l
單位換算	me／l	NO_3—N16 NH_4—N1.33 } 17.33	4	8	8	4	4	⊕24＞48me／l ○24＞2.396me／l（ppm）
	ppm	14mg／l×17.33=242	10.3mg／l×4=41.2	39mg／l×8=312	20mg／l×8=160	12mg／l×4=48	16mg／l×4=64	—
	mM／l	NO_3—N16me÷1=16 NO_4—N1.33÷1=.33	4me÷3=1.33	8me÷1=8	8me÷2=4	4me÷2=2	4me÷2=2	⊕19.33 ○19.33 ＞38.6mM／L

◉電導度（m mho）與 me／l之關係：自來水（含 CaO.6，MgO.4，KO.1，pH為6.8）含在內48me／l時 EC為2.22m mho，其½的24me／l時為1.38m mho，1.5倍的72me／l時為4.16m mho。

○滲透壓（氣壓）與 m M 之關係：依 Van't Hoff 定律 1mM 培養液為0.0224×（273＋X℃）／273。38.6mM／l培養液於17℃時為38.6×0.0224×（273＋17）／273=0.8氣壓。

＊低溶解度的 $CaSO_4$•$2H_2O$ 於23me／l以上時就可見沈澱發生。

氮和鉀，增加鈣含量的番茄專用培養液，以 N 10，P 4，K 6，Ca 10，Mg 4，S 4 me／l 推廣到農家。

之後山崎氏與本人在東京教育大學農學部，測定了蔬菜別的吸收濃度（n／w），發表了不同蔬菜培養液組成濃度。吸收濃度之測定方法如下：

水耕裝置的總容水量為 a；園試均衡培養液的施用量為 m，其濃度為 y 時：

$$y=\frac{m}{a}$$

在一定時期內肥料量 n 被吸收，同時耗水量為 w 時，該培養液的濃度測定為 Y_1時：

$$y_1=\frac{m-n}{a-w}$$

補充水 w 至 a，其濃度為 Y_2時：

$$y_2=\frac{m-n+wy_0}{a}\text{（}y_0\text{為自來水濃度）}$$

以 y 和 y_1，y_2 可得

$$n=ay-(a-w)y_1=ay-ay_2+wy_0$$

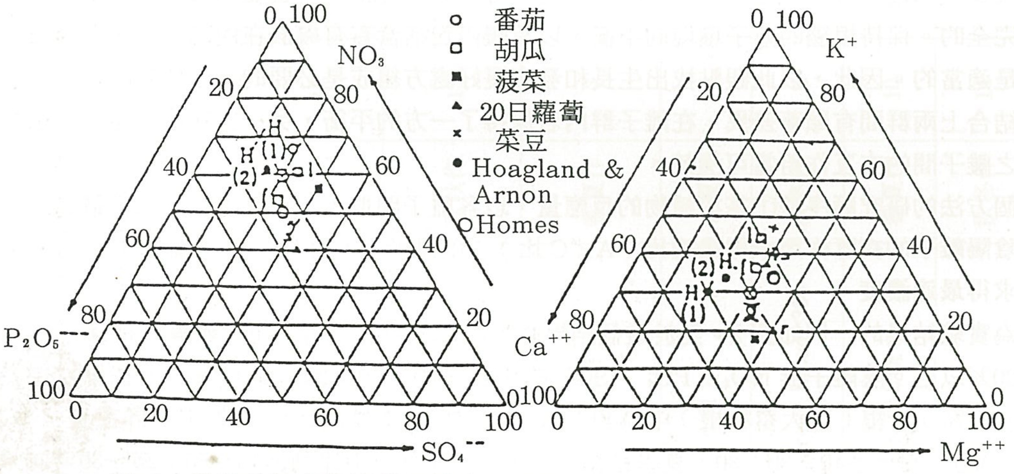
因此，測定 y_1 時

$$n/w=\frac{1}{w}[ay-(a-w)y_1]=\frac{a}{w}(y-y_1)+y_1=y_1-\frac{a}{w}(y_1-y) \quad \cdots\cdots(1)$$

測定 y_2 時

$$n/w=\frac{1}{w}(ay-ay_2+wy0)=\frac{a}{w}(y-y_2)+y_0 \quad \cdots\cdots(2)$$

此 w 是包括葉面蒸發量＋水面蒸發量＋生長的吸水量。n／w 並非真正的根吸收濃度，可以說是對培養液管理之濃度維持上的意義，並表示作物的特性。n／w，y，y_1 等單位為表示培養液濃度時，是以園藝試均衡培養液作為基準的培養液濃度比，五要素以 me／l 表示之。而且培養液以電導度計來測定，電導度（Simens 或 mho）與濃度之關係於事先行測定以供對照當是很為便利的。



圖二　以培養液中陰陽離子濃度的系統變量法所訂之蔬菜適宜組成

經由10年的研究結果，於表二整理出了各種蔬菜的最適 n／w，其結果可看出：

①無論那種作物的那個生育階段都是 w 多。生育良好時的 NO_3－N 和 K＋Ca，P 和 Mg 的 n／w 大致相等，因其當量均衡地被吸收。

②依作物別之特性此五要素之 n／w 之 NO_3—N 濃度差，與其當量的 K＋Ca 濃度間可看出其拮抗性的存在。NO_3—N 的 n／w 蕪菁⒁＞甜瓜⒀＞茄子⑽＞胡瓜⑼＞甜椒⑻＞番茄⑺＞萵苣⑺。K 和 Ca 的 n／w 上，Ca＞K 的有甜瓜（K：Ca＝6：7），胡瓜（4：5）。Ca＜K 的有番茄（K：Ca＝4：3）、甜椒（6：3）、萵苣（4：2）、茄子（7：3）、蕪菁（10：4）。

③培養液組成濃度受溶氧、生育期、氣溫、液溫、日照的影響，既使相同作物也受品種、栽培方式、栽培管理等的強烈影響。五要素的 n／w 相互變動，嚴重時，造成落果，軟球，抑制根部的膨大或引起頂腐病，裂果等生理障害。因此，表 2 的 n／w 值為避免這些障害發生的標準值。

④n／w 發生變化的原因與作物本身特性，受作物的耐鹽性，及鹽類吸收選擇性有所影響，同時根的吸收速度也受同化之運轉有所規律。

⑤對於水耕實用化，最重要是維持 n／w 的標準值，n／w 之維持是要有相同 n／w 之培養液之組成濃度也即是 n／w／y＝N／W＝1 的話，培養液之組成濃度、pH 之變化就很少。或許也有點變化的話依表二的標準值 NO_3－N 和 K＋Ca 的 n／w 當量比相同，以 KNO_3 和 $Ca(NO_3)_2$ 量的多少加減來調整培養液的話，其 pH 之變化很少。EC 雖因 Ca 多而略有下降，但也變化不大。

⑥n／w 的變化比標準值變化較大時，當然培養液的 pH 也發生變化。NO_3－N 和 K 之 n／w 變大，而 Ca 變小時，其培養液 pH 升高。相反時 pH 則降低。這個現象在培養液濃度越低時顯著，濃度高時則變化少。還有也受用水 pH 的影響。

⑦培養液的溶氧維持在40％以上時，對 w 和 n／w 無所影響，但溶氧在20％以下時，w 之減少比 n 為多，使 n／w 比標準值升高，植物體的生育因而受抑制，乾物重也隨而增加。

以 n／w 所建立之培養液管理，經神奈川園藝試驗場與其他不同之培養液行比較，結果仍以 n／w 得到了最好的結果。因此受到了實際栽培農家的應用。

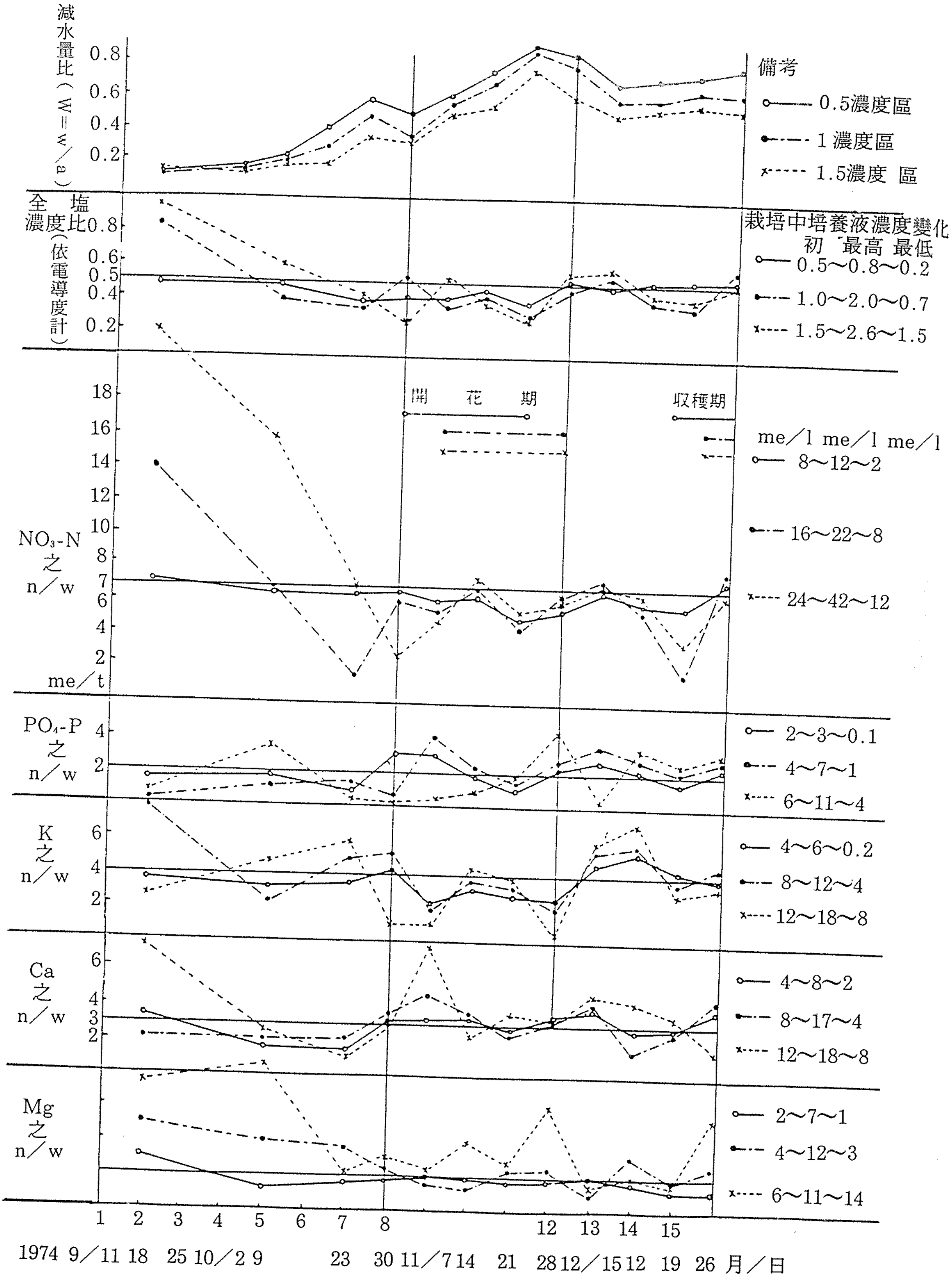
名城大學農學部的高野氏用 Homes 的系統變量法檢討大量元素的平衡方法，提倡自培養液之組成之方向使其平衡。也就是大量元素因機能不同而可分為 NO_3^-、PO_4^{3-}、SO_4^{2-} 的 3 個陰離子和 K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+} 的 3 個陽離子二大類。作成一個平衡營養液，一直是只考慮 N、P、K 的比例是不完全的。保持根圈的離子環境的平衡，以及體內包括含有有機酸在內的陰離子與陽離子的平衡才是適當的。因此，以此觀點找出生長和發育良好處方組成是必要的。由於陰陽離子之吸收和化學結合上兩群間有顯著差異，在離子群內若保持了一方的平衡，另一方在群內可以自由變化，群內之離子間的交互作用當可清楚。

這個方法的研究順序是①基於植物的反應量，以各離子間群內的交互作用，求得最適比例；②根據陰陽離子的交互作用求得最適比（A／C 比）；③基於這些結果，用 3 種水平以上的濃度試驗，求得最適濃度。

作為實驗結果的一例如圖 2。對於這個結果高野氏作下列的說明：通常無論那種離子在離子群內占20％以上。陰離子群 NO_3^-、PO_4^{3-}、SO_4^{2-} 的比在葉中為60：20：20（％），在果實中為50：25：25（％）；根（肥大莖和根）中為40：30：30（％）為最適比例。陽離子群在春秋季 K^+：Ca^{2+}：Mg^{2+} 的比是40：30：30，夏季是30：40：30。在葉菜中比例為40～50：25～30：20～25，鉀的比例予以提高。另外若提高 Ca 的比例，NO_3^-的比例也能提高。NH_4^+在陽離子中含 6～7％

表二 數種蔬菜的適宜 n／w

作物品種	期作	N me／l	P me／l	K me／l	Ca me／l	Mg me／l	培養液濃度 營養生長期	培養液濃度 肥大成熟期	培養液管理
洋香瓜（溫室用）	春夏作	13	4	6	7	3	1	1	溶氧40％以上，但後熟期在20％以下。露地品種之濃度以0.7—0.8
胡瓜（四葉）	夏秋作	13	3	6	7	4	1	0.7	肥大期0.8以上蔓易徒長，但冬季低溫期時不要緊。
番茄（FTVR-3）	春夏作	7	2	4	3	2	1	1	濃度高時缺Ca，易產生頂腐病果。冬作以1.2—1.4為宜。
甜椒（下總）	春夏作	9	2.5	6	3	1.5	1	1	濃度低時分枝變差
萵苣 Great Lakes 366	秋冬作	6	1.5	4	2	1	1	1	濃度高時易產生軟球
茄子（長交2號）	春夏作	10	3	7	3	2	1	1	濃度低時分枝變差
蕪菁（金町）	秋冬作	14	2	10	4	2	0.5	1	營養生長期濃度高時，根的肥大變差



圖一　培養液濃度と與減水量比（W＝w／a）及其吸收成分濃度（n／w）之關係

表三　依系統變量法所得之培養液組成

試藥	me	mg／l
KNO_3	6	606
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	7	825
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	4.4	511
$NH_4H_2PO_4$	4 (NH_4^+ 1.33)	153
計		2,126

	離子	NO_3^-	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	NH_4^+	A/C	總濃度 (me／l)
	me	13	4	4.4	6	7	4.4	1.33	1.143	40.13
	%	60.7	18.7	20.6	32.0	37.4	23.5	7.1	—	—
參考	H-A me	14	3	4	6	8	4	1	1.105	40
	園試 me	16	4	4	8	8	4	1.33	1.125	45.33
	Homes me	13	7.18	7.18	6.4	8.5	6.4	1.44	1.203	50.1

表四　培養液之微量要素化合物之濃度

要素	適宜濃度 ⓐppm	化合物 名稱	化合物 分子式	分子量	含有率 ⓑ（%）	化合物濃度 ⓐ／ⓑ（mg／l）	溶解度（g／l）	價格（圓／kg）
Fe	3	鉗形鐵	Fe-EDTA	421	12.5	24	421	1,000
		或硫酸亞鐵	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	270	20.0	15	260	220
B	0.5	硼酸	H_3BO_3	62	18.0	3	100	250
		或硼砂	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	381	11.6	4.5	25	250
Mn	0.5	氯化錳	$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	198	28.0	1.8	735	700
		或硫酸錳	$MnSO_4 \cdot 4H_2O$	223	23.5	2	629	1,400
Zn	0.05	硫酸鋅	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	288	23.0	0.22	550	220
Cu	0.02	硫酸銅	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	250	25.5	0.05	220	360
Mo	0.01	鉬酸鈉	Na_2MoO_4	206	47.0	0.02		2,400
		或鉬酸銨	$(NH_4)_2MoO_4$	196	49.0	0.02		2,300
Cl	1.75	KNO_3中之不純物，或用水中已含有。35ppm 內為限，350ppm 以上則有害						

的話，則 NO_3^-：PO_4^{-3}：SO_4^{2-}＝60：20：20，K^+：Ca^{2+}：Mg^{2+}：NH_4^+＝28：38：27：7 為最適比。參考這個比例所訂的蔬菜培養液如表三。以此系統的變量法所訂培養液的組成 NO_3^- 的比例變低，PO_4^{3-}、SO_4^{2-}、Mg^{2+}等的比例則予提高。

二、微量元素

通常利用 Arnon 實驗的決定值（參照表四）。養液栽培的時候，除 Fe、B、Mn 以外都是極微量的，用水中的含量已經足夠了。Fe 的追肥是每月一次，B 和 Mn 是三個月一次就足夠了。但是在生長旺時，在更短的時間內追加是必要的。據筆者經驗，生育越好，微量元素的吸收量也愈多。

引用文獻

1.山崎肯哉　1966　礫耕の經過と進路　農業技術　21（3）：1。

2.山崎肯哉　1973　培養液の化學性　農耕と園藝別册　野菜の養液栽培　pp. 22-26。

3.山崎肯哉、鈴木芳夫、篠原　溫　1976　そ菜の養液栽培（水耕）に關する研究　特に培養液管理とみかはの吸收濃度（n／w）に就て　東京教育大學農學紀要　No.23　pp.53-100。

4.佐佐木皓二　1982　養液栽培の現狀と問題點〔3〕—水耕栽培における培養液處方と2・3の管理技術　農業および園藝　57（5）：677-682。

5.高野泰吉　1981　養液栽培の現狀と問題點〔2〕水耕栽培養液の組成について農業および園藝　56（7）：919-924。